

Juha Nord

## **ENERGIAMITTARIN KEHITYSTYÖ**

# **ENERGIAMITTARIN KEHITYSTYÖ**

Juha Nord  
Opinnäytetyö  
Kevät 2014  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu

Tietotekniikan koulutusohjelma, langattomien laitteiden suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Juha Nord

Opinnäytetyön nimi: Energiamittarin kehitystyö

Työn ohjaaja: Ensio Sieppi

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2014 Sivumäärä: 37 + 8 liitettä

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää edelleen kevään 2013 projektissa SuLA:lle tuotettua energiamittaria. Tarkoituksena oli luoda alusta, jonka jatkokehitys olisi helppoa ja josta kehittyisi mahdollisesti jopa kaupallistettava tuote.

Opinnäytetyössä tutustuttiin ensin säädöksiin ja vaatimuksiin, jotka vaikuttavat sähkölaitteen hyväksyntään vaadittavien kriteerien huomioonottamiseen piirilevyjen suunnittelussa ja komponenttien valinnassa. Koska pohjana oli jo olemassa oleva laite, oli laitesuunnittelun seuraava vaihe etsiä tehokkaampi kontrolleri riittävillä laajennusominaisuuksilla. Ohjelmistokehitykseen käytettiin Atmelin ilmaista AVR Studio -ohjelmistoa. Piirilevyjen suunnittelussa käytettiin CadSoft EAGLE -ohjelmistoa.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin energiamittausjärjestelmän päätelaitteen prototyyppi, jota voi käyttää pohjana kaupallisen laitteen suunnitteluun ja jatkokehitykseen.

---

Asiasanat: EMC, energian mittaus, sähköverkko, tiedonsiirto, älykäs mittari

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Information Technology and Telecommunications, Option of Wireless Devices

---

Author: Juha Nord

Title of thesis: Development of the energy meter

Supervisor: Ensio Sieppi

Term and year when the thesis was submitted: spring 2014 Pages: 37 + 8 appendices

---

This thesis is further development of the energy meter EM-12, which was first developed as spring project in 2013.

Because thesis was based on the existing design, next step in development was to choose more powerful microcontroller. Faster and more complex controller also affect on PCB design. EMC and radio interference had to be taken into account in design, because device must be immune for external interference and control RF emissions from device. Software development tool was Atmel AVR Studio, which is free to download and use. PCB design software was CadSoft EAGLE.

---

Keywords: EMC, energy measurement, power grid, data communication, smart meter

## **ALKULAUSE**

Tämä opinnäytetyö tehtiin SuLA-hankkeelle OAMKin tiloissa kesällä 2013 – talvella 2014. Työn ohjaajana toimi Oulun ammattikorkeakoulun puolesta yliopettaja Ensio Sieppi. Tilaajana ja valvojana toimi projektisuunnittelija Henry Hinkula. Kiitokset ohjaajalle ja valvojalle avusta opinnäytetyön aikana.

Oulussa 2.6.2014

Juha Nord

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
2 ENERGIAMITTARI EM-12	9
3 VERKKOVIRRAN TEHO	11
3.1 Induktiivinen reaktanssi	12
3.2 Kapasitiivinen reaktanssi	13
3.3 Reaktanssin vaikutus tehoon	13
3.4 Muut häiriömuodot	14
4 EMC LAITTEEN SUUNNITTELUSSA	17
5 32-BITTINEN EM-12	18
5.1 Sovituskortti CH-2	19
5.1.1 Integroitu USB	21
5.1.2 µSD-korttipaikka	22
5.2 Mittauskortti MC-6	23
5.3 Liikennöintikortti CC-2	26
5.4 I <sup>2</sup> C-laajennusväylä	27
5.5 Merkkivalot ja painikkeet	28
5.6 Ohjelmisto	29
6 MITTARIN KALIBROINTI	32
7 TESTAUS	33
7.1 Elektroniikan testaus	33
7.2 Ohjelmistojen testaus	33
8 YHTEENVETO	35
LÄHTEET	36
LIITTEET	37

## LYHENTEET

ASF	( <u>A</u> tmel <u>S</u> oftware <u>F</u> ramework) Atmelin ohjelmistokirjasto kontrolle- reille. Sisältää valmista koodia alimmalta rajapinnalta (driver) ylim- mälle sovellustasolle (API) asti.
CDC	( <u>C</u> ommunications <u>D</u> evice <u>C</u> lass) USB:n rajapintamalli, jolla kytketty laite saadaan näkymään virtuaalisena sarjaliitännäisenä laitteena tietokoneessa.
EMC	( <u>E</u> lectromagnetic <u>c</u> ompatibilty) sähkömagneettinen yhteensopivuus määritellään EMC-standardien IEC 61000 -sarjassa.
MCU	( <u>M</u> icro <u>C</u> ontroller <u>U</u> nit) Mikrokontrolleri sisältää prosessorin lisäksi muistia ja I/O-piirejä samassa kotelossa.

# 1 JOHDANTO

Energiamittari EM-12 suunniteltiin ja valmistettiin keväällä 2013 osana EU-rahoitteista SuLA-projektia (1). EM-12-projektin tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa edullinen valvottaviin kiinteistöihin asennettava etäluettava energiamittari. Kiinteistöistä piti saada mitattua kytkettyjen laitteiden jännite, virta ja niiden aiheuttama häiriö (vaihesiirto  $\cos\phi$ ) sähköverkkoon päin.

Laite saatiin valmiiksi ja siitä saadut dokumentit ja kokemukset toimivat opinnäytetyön lähtökohtana.

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää aiempaa EM-12-projektia eteenpäin ja suunnitella kaupallisesti hyödynnettävä energiamittari (liite 1), jonka suunnittelussa ja testauksessa hyödynnettäisiin uusimmat EMC-standardit ja -määräykset. Opinnäytetyön liitedokumentit jäävät vain tilaajan käyttöön.



## 2 ENERGIAMITTARI EM-12

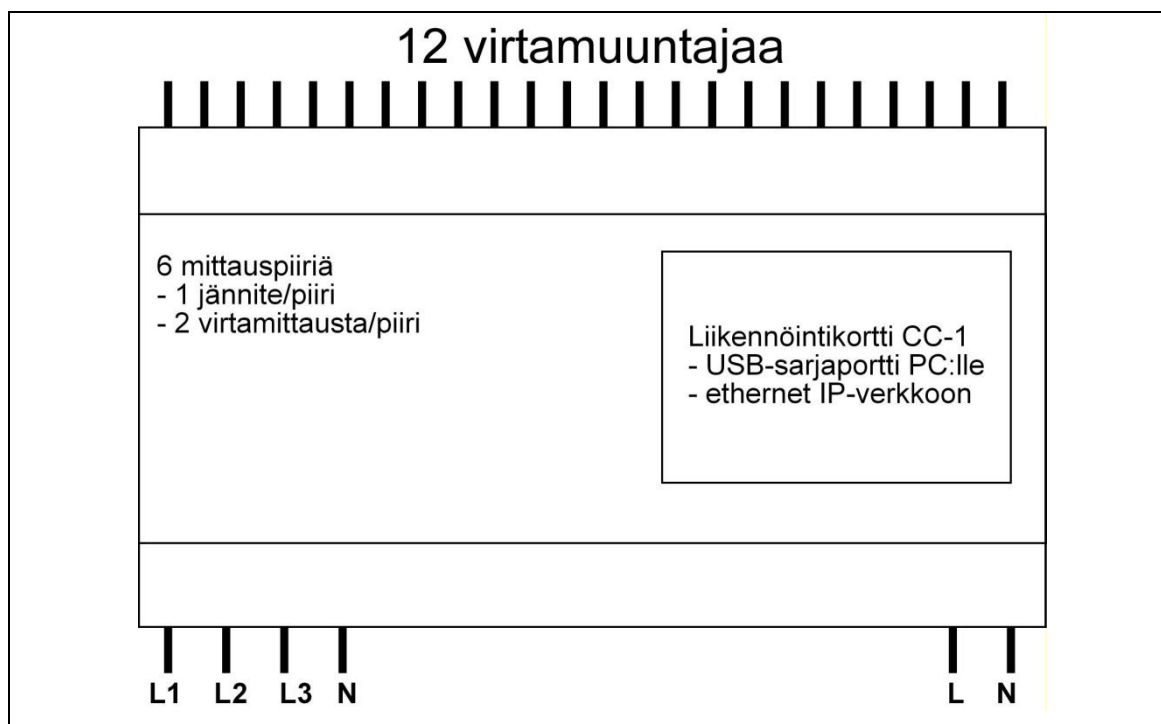
Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kevään 2013 projektissa luodun kiinteistön energiamittari EM-12:n jatkokehitys. EM-12 on energiamittari, jolla voidaan mitata 12 laitteen virrankulutusta ja niiden aiheuttamaa vaihesiirtoa ( $\cos\phi$ ) sähköverkkoon päin. Kerättyjen tietojen (jännite, virta ja  $\cos\phi$ ) avulla tiedot keräävä tietokone pystyy laskemaan lois- ja pätötehon.

Kuvassa 1 on esitetty EM-12:n ulkoiset liittynät sähkökeskukseen. Laite koostuu kolmesta piirilevystä:

Pohjakortista, jossa on kontrolleri, liittimet ja sovitukset sähköverkkoon.

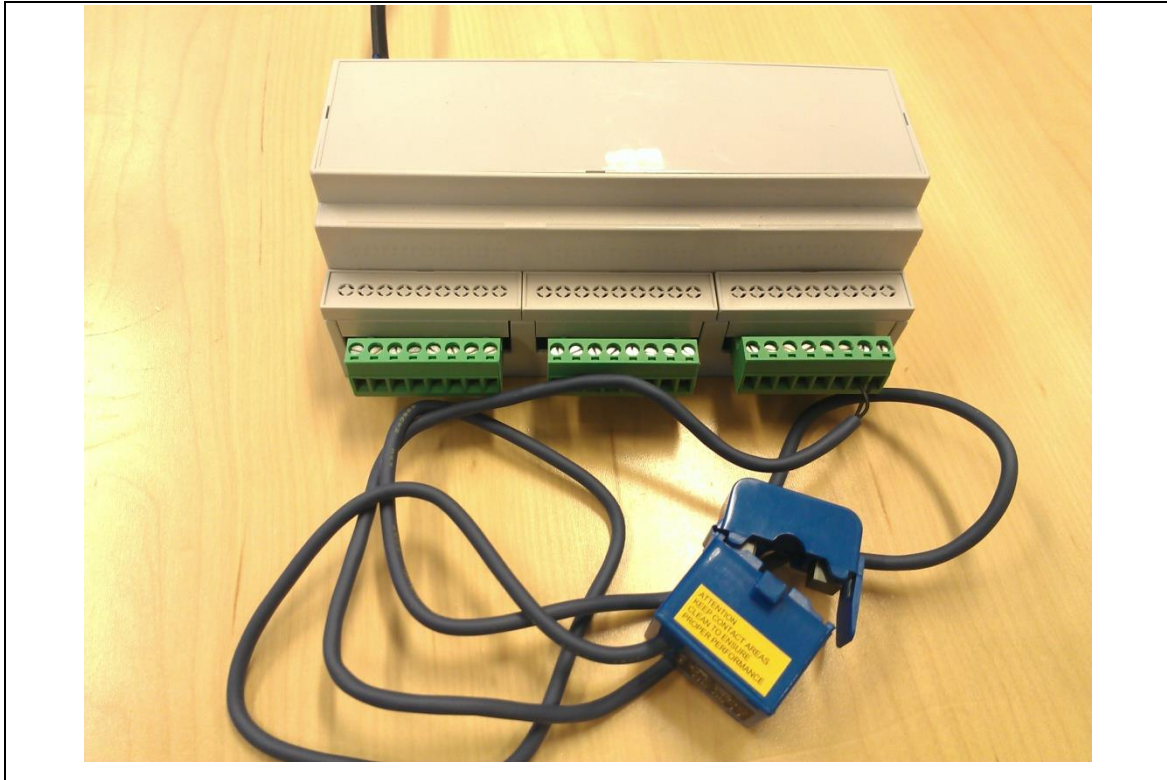
Mittauskortista, jossa kiertokytkimillä valitaan kullekin piirille jännite (L1, L2, L3).

Liikennöintikortista, jolla laite liikennöi joko tietokoneelle (USB) tai mittaustiedot keräävälle tietokoneelle (ethernet).



KUVA 1. Kevätprojektin EM-12-mittari

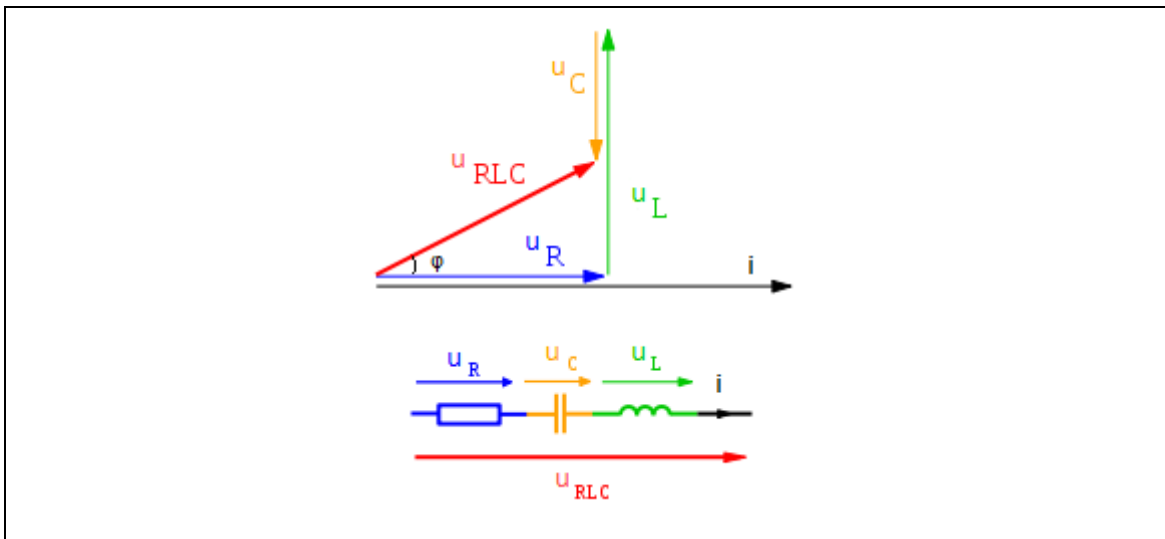
Kuvassa 2 näkyvät ruuviliittimet ovat irrotettavia, joten anturien kaapelointi voidaan tehdä aiheuttamatta ylimääräistä mekaanista rasitusta itse mittauslaitteelle. Jokaiseen kolmeen ruuviliittimeen voidaan kytkeä neljä virtamuuntajaa.



*KUVA 2. Koteloitu EM-12 ja virtamuuntaja*

### 3 VERKKOVIRRRAN TEHO

Suomen sähköverkosta kotitalouksiin tulevan vaihtosähkön nimellinen jännite ( $u$ ) on 230 V ja vaihtovirran taajuus ( $f$ ) 50 Hz. Koska laite suunnitellaan kotimaan sähköverkkoon liitettäväksi, käytetään seuraavissa kaavoissa näitä arvoja. Esitetyt kaavat on koottu Tekniikan kaavastosta (2). Sähköyhtiöt laskuttavat kotitalouksia kulutetun pätötehon mukaan (kaava 1). Isot teollisuuslaitokset joutuvat maksamaan myös loistehosta (kaava 3). Kuten pätötehon kaavasta ja kuvasta 3 nähdään, kytketyn kuorman kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi vaikuttavat pätötehoon heikentävästi.



KUVA 3. Eri komponenttien vaikutus jännitteen ja virran suhteeseen.

Mitä suurempi  $\cos\varphi$  on, sitä enemmän virtaa ja jännitettä tarvitaan saman tehon saamiseksi verrattuna  $0^\circ$ :n vaihesiirtoon.

Kaavoissa 1–4  $u$  on laitteen nimellisjännite [V] ja  $i$  sen ottama virta [A]. Kaavoissa oleva  $\varphi$  kertoo kuorman reaktiivisten komponenttien vaikutuksen jännitteen ja virran väliseen vaihesiirtoon.

$P = u * i * \cos\varphi$	[W]	KAAVA 1.
$S = u * i$	[VA]	KAAVA 2.
$Q = u * i * \sin\varphi$	[var]	KAAVA 3.
$P = R * i^2 * \cos\varphi = \frac{u^2}{R} * \cos\varphi$	[W]	KAAVA 4.

Koska resistiivisessä kuormassa ei ole induktiivista ja kapasitiivista komponenttia, on sen vaihesiirto  $0^\circ$  ja loistehoa ei esiinny. Jännite- ja virtavektoreiden välisen kulman ollessa  $0^\circ$  ( $\cos\varphi = 1$ ) voidaan tehon laskennassa käyttää kaavaa 4.

### 3.1 Induktiivinen reaktanssi

Kela ja siihen rinnastettavat elementit aiheuttavat vaihesiirtoa jännitteen ja virran suhteen siten, että jännite on virran edellä. Induktiivinen reaktanssi ( $X_L$ ) saadaan laskettua kaavalla 5.

$X_L = 2 * \pi * f * L = \omega * L$	[Ω]	KAAVA 5.
--------------------------------------	-----	----------

Kaavassa  $f$  on taajuus (sähköverkossa 50 Hz) ja  $L$  on kuorman induktanssi [H]. Vektori  $X_L$  on  $90$  asteen kulmassa resistiiviseen vektoriin  $R$ .

Tyypillisiä induktiivisia kuormia ovat 1-vaiheoikosulkumoottorit, jotka ovat pääosiltaan sähkökentässä pyöriviä keloja. Moottorien yhteydessä kompensointikondensaattori on yleensä moottorin kytkentäkotelossa. Kondensaattorilla pyritään kumoamaan tai oleellisesti vähentämään induktiivisen reaktanssin aiheuttamaa vaihesiirtoa.

### 3.2 Kapasitiivinen reaktanssi

Kondensaattori ja siihen rinnastettavat elementit aiheuttavat vaihesiirtoa jännitteen ja virran suhteen siten, että virta on jännitteen edellä. Kapasitiivinen reaktanssi ( $X_C$ ) saadaan laskettua kaavalla 6.

$X_C = -\frac{1}{2\pi f C} = -\frac{1}{\omega C}$	$[\Omega]$	KAAVA 6.
---	------------	----------

Kaavassa  $f$  on taajuus (sähköverkossa 50 Hz) ja  $C$  on kuorman nimellinen kapasitanssi [F]. Vektori  $X_C$  on  $-90$  asteen kulmassa resistiiviseen vektoriin  $R$ .

Tyypillisiä kapasitiivisen reaktanssin aiheuttajia ovat hakkuriteholähteet ja tyristorisäätimet (kotivalaistuksen himmentimet), koska näiden toimintaperiaatteen kuuluu jännitteen katkominen. Kapasitiivisen reaktanssin vaikutusta voidaan kompensoida lisäämällä kela sähkönsyöttöön, jolloin vaihesiirtoa saadaan pienennettyä.

### 3.3 Reaktanssin vaikutus tehoon

Jotta reaktanssikomponenttien kokonaisvaikutus tehoon saadaan laskettua, on ensin selvitettävä kytkennän kokonaisimpedanssi. Impedanssin reaktiivinen osa saadaan kaavalla 7.

$X = X_L - X_C$	KAAVA 7.
-----------------	----------

Kytkenän kokonaisimpedanssi ( $Z$ ) saadaan laskemalla ensin reaktiivinen osa kaavoilla 5, 6 ja 7. Saatu reaktiivinen komponentti  $X$  sijoitetaan kaavaan 8, jos-

sa  $R$  on kuorman nimellinen resistanssi  $[\Omega]$ . Reaktanssiosan aiheuttama vaihesiirto saadaan kaavalla 9.

$ Z  = \sqrt{R^2 + X^2}$	$[\Omega]$	KAAVA 8.
$\varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$	Kulma radiaaneina	KAAVA 9.

Kuva 3 havainnollistaa  $X_L$ :n ja  $X_C$ :n vaikutuksen vaihesiirtoon.  $R$  on  $u_R$ :n suuntainen,  $X_C$  on  $u_C$ :n suuntainen ja  $X_L$  on  $u_L$ :n suuntainen. Jännite ( $u$ ) lasketaan resistanssin ( $R$ ) ja virran ( $i$ ) tulosta, josta saadaan vastaavasti  $u_C$  ja  $u_L$  laskemalla  $X_C$ :stä ja  $X_L$ :stä. Koska  $X_L$  on positiivinen arvo, lisätään  $u_L$ -vektori  $u_R$ :n päästä ylöspäin.  $X_C$  on negatiivinen arvo, joten  $u_L$ -vektorista vähennetään  $u_C$ :n pituus. Tähän päätepisteeseen tuleva origovektori kertoo pituudellaan jännitteen ja sen kulmapoikkeama  $u_R$ -vektorista on reaktiivisten elementtien aiheuttama vaihesiirto.

Laskennoissa tarvittava tehokerroin ( $\cos\varphi$ ) saadaan resistanssin ja kokonaisimpedanssin suhteesta kaavalla 10.

$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$	KAAVA 10.
-----------------------------	-----------

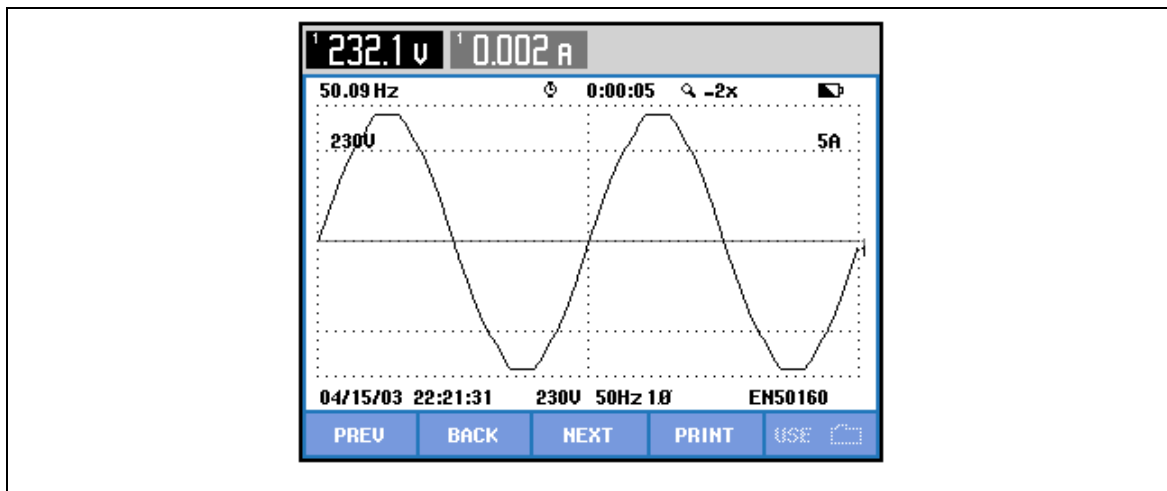
### 3.4 Muut häiriömuodot

Harmoniset yliaallot ovat verkon taajuuden (50 Hz) parittomia kerrannaistajuuksia: 3x (150 Hz), 5x (250 Hz), 7x (350 Hz), 9x (450 Hz), 11 (550 Hz) jne. Mikäli näiden kerrannaistajuuksien teho on riittävä, aiheuttavat ne summautuksessaan perussähköön sen säröytymistä.

Harmonisia häiriöitä varten voidaan sähkökeskukseen lisätä RLC-elementeillä. Nämä voivat olla kiinteästi kytkettyjä vastus-kela-kondensaattorielementtejä tai mittausautomaation kytkemiä ja irrottamia elementtejä. Automaatiota käytetään silloin, kun kuormituksen vaihtelut ovat suuria ja epäsäännöllisiä.

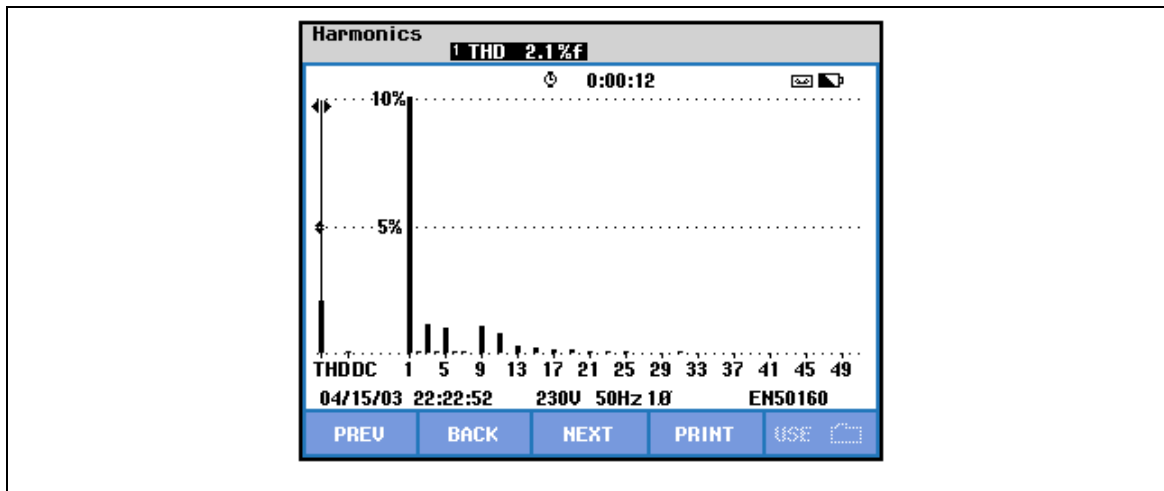
Ennen varsinaisia mittauksia tutkimme koulun sähköverkkoa käyttämällämme kalibroinnin verrokkimittarilla (Fluke 435). Havaittiin seuraavaa:

Laboratorion verkkosähkön jännitteen muoto ei ollut siniä, vaan siinä oli havaittavissa huippujen tasoittumista ja kaventumista (kuva 4).



KUVA 4. Säröytynyt jännite

Lisäksi sähköverkossa havaittiin harmonisia häiriöitä kerrannaisilla 3x, 5x, 9x ja 11x (kuva 5).



KUVA 5. Harmoniset häiriöt



## 4 EMC LAITTEEN SUUNNITTELUSSA

EMC (Electromagnetic compatibility) laitesuunnittelussa tarkoittaa sitä, että suunniteltava laite ei häiritse omalla sähkömagneettisella kentällään toisia sähkölaitteita ja se kestää tietynlaiset ulkoiset sähkömagneettiset häiriöt.

Säteilevää kytkeytymistä vastaan suojaudutaan pinnoittamalla tai valmistamalla kotelo johtavasta materiaalista. Piirilevysuunnittelussa vastaavasti tätä vastaan voi suojautua suunnittelemalla monikerroksisen levyn ja lisäämällä maa-alueita estämään ja heijastamaan radioaaltoja.

Induktiivista ja kapasitiivista kytkeytymistä vastaan voi suojautua käyttämällä suojattua kaapelia, jonka suojavaippa sitten maadoitetaan johtamaan kytkeytyneen energian maahan. Piirilevyllä vastaavasti voidaan lisätä levyyn kerroksia, jotka ovat signaalimaassa ja täten johtavat energian hallitusti pois herkiltä alueilta.

Galvaanista kytkeytymistä vastaan voidaan lisätä EMC-suojakeloja laitteen ulkopuolelle meneviin johtimiin ja piirilevyllä lisäämällä keloja liittimien lähelle ja jännitesyöttölinjoihin. Yleensä jo pelkän ferriittihelmen lisääminen johtoon riittää.

Edellä mainitut suojausmenetelmät suojaavat myös ulkoisia laitteita suunnitellun laitteen mahdollisesti aiheuttamilta häiriöiltä.

Piirilevyjen suunnittelussa seurattiin piirivalmistajien (Cirrus Logic ja Atmel) EMC- ja PCB-suunnitteluohjeita. Ohjeiden perusteella suodatinkondensaattorit asetettiin mahdollisimman lähelle piirejä ja jännitelinjoihin käytettiin leveämpää johdinvetoa kuin signaaleilla. Piirien vaatimat kellot generoitiin oskillaattoreilla ja ne asennettiin piirilevyn juotospuolelle, jotta mahdollinen suurtaajuussäteily heijastuisi laitteen takana olevaa teräslevyä kohti ja piirilevyn komponenttipuolella oleva maataso estää säteilyn laitteen yläpuolelle.

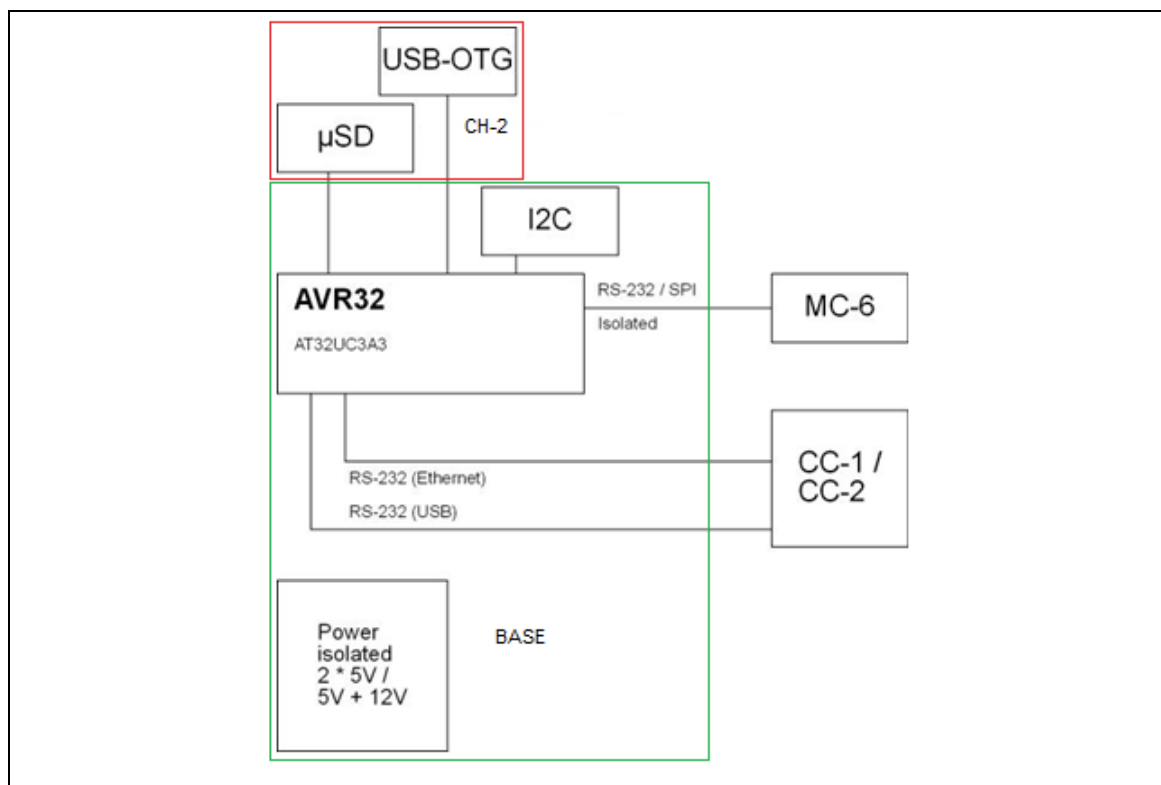
## 5 32-BITTINEN EM-12

Jatkokehityksen ensimmäisenä tehtävänä oli uuden tehokkaamman mikrokontrollerin valinta. Valintaan vaikuttivat kontrollerin yksikköhinta, saatavuus, integroidut I/O-lohkot ja kehitysympäristö. Atmelin AVR Studio 6 oli tullut tutuksi 8-bittisen kehityksessä ja tuore 6.1-versio vaikutti edellistä versiota vakaammalta, joten tämä yhdessä helposti saatavien edullisten ja monipuolisten kontrollerien kanssa vaikuttivat Atmelin 32-bittisten kontrollerien tutkimiseen. 32-bittisistä ARM- ja UC3-pohjaisista kontrollereista tulivat valituksi UC3-pohjaiset kontrollerit yksinkertaisemman rakenteen takia. Lopullisesti tuli valittua AT32UC3A3128 (3) ja sen valintakriteerit löytyvät liitteestä 2 (Mikrokontrollerin valinta).

AVR Studio sisältää lisäksi Atmelin ASF-kirjastojen (Atmel Software Framework) liitynnän, jonka kautta projektiin saadaan helposti liitettyä valmiita testattuja ja esimerkkikoodin pätkiä ja rutiineja.

Tehokkaamman kontrollerin myötä myös liitynnät päivittyivät. Integroitu USB, joka on high speed (USB 1.x-) ja full speed (USB 2) -yhteensopiva, toimii testauksen liittymänä ja myöhemmin asentajan liittymänä PC-ohjelmalle. Suunnittelussa otettiin myös jatkokehitys huomioon. Levyn kalustusta muuttamalla tästä saadaan USB OTG -liittymä, joka sallii esimerkiksi USB-liitäntäisen GSM-terminaalin ohjaamisen CDC-rajapinnan (Communications Device Class) kautta ja sähkönsyötön laitteelle. Integroitu  $\mu$ SD-kortin liitin mahdollistaa laitteen toiminnan muuttamisen kortilla olevilla parametreilla ja mittaustiedon keräämisen kortille. Koska USB on integroitu, suunniteltiin liikennöintikortista yksinkertaisempi versio (CC-2), jossa on vain ethernet ja RS-232-puskurointi. Ethernetin kautta laite on mahdollista kytkeä kiinteistön internetin kautta palvelimille ja RS-232 mahdollistaa liitynnän paikallisautomaatioon.

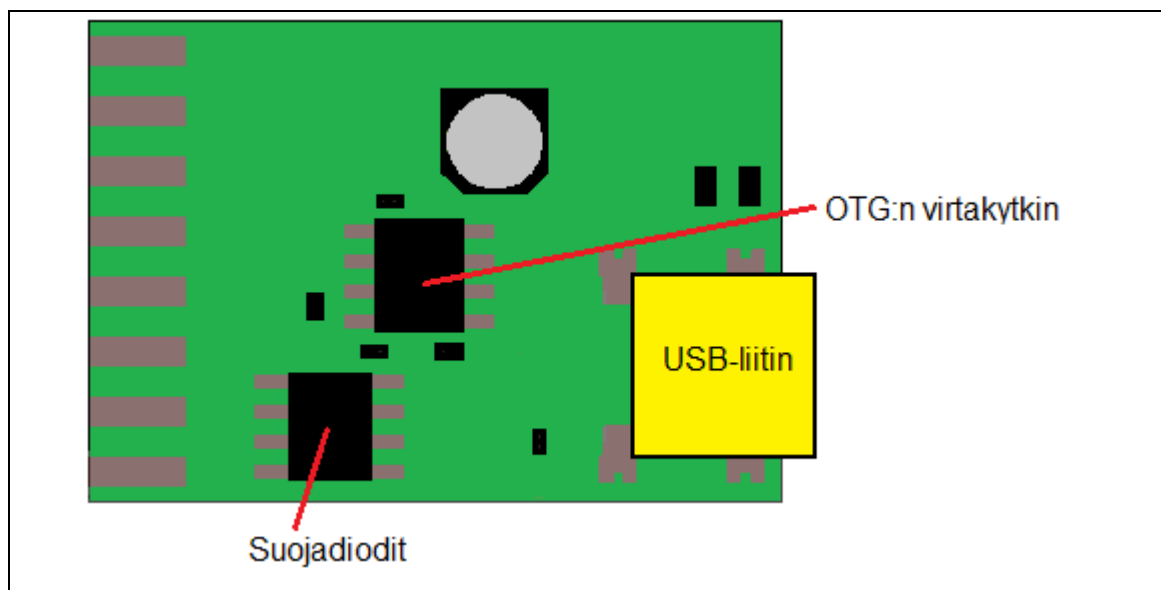
Uudistettu EM-12-laite on neljän kortin kokonaisuus (kuva 6). Kortin kytkentäkaavio on liitteessä 3. Pohjana toimivaan korttiin (BASE) kytketään anturit, sähkönsyöttö ja kaikki liityntäkortit. Mittaukset ja anturisovitukset tapahtuvat mitauskortilla (MC-6). Liikennöintikortti (CC-1 tai CC-2) sovittaa lähetettävät tiedot liitosväylään sopiviksi (USB, RS-232, ethernet).



KUVA 6. EM-12-mittarin lohkokaavio

## 5.1 Sovituskortti CH-2

Korttiin (kuva 7) on integroitu kaksi MCU:n (Micro Controller Unit) rajapintaa. Kortin kytkentäkaavio on liitteessä 5. Kortin yläpuoli on USB-sovitin ja alapuolella on μSD-kortin sovitin. Kortin liittimen signaalit on esitelty kuvassa 8.



KUVA 7. CH-2 piirikortti

CH-kortin liittimellä (kuva 8) on tarvittavat signaalit USB:n, USB OTG:n ja SD-kortin hallintaan.

+5V	1	2	+5V
SPI_CARD	3	4	+3.3V
SPI_MOSI	5	6	SPI_SCK
USB_ID	7	8	SPI_MISO
VBUS_EN	9	10	SPI_CS
VBUS_OC	11	12	VBUS
USB_D+	13	14	GND
USB_D-	15	16	GND

KUVA 8. CH-kortin signaalit

SD-kortin liittimen mikrokytkimeltä tuleva kontakti kertoo, onko kortti paikalla vai poissa (SPI\_CARD). Liikennöinti kortille tapahtuu kortin valintasignaaililla (SPI\_CS), sarjaväylän kellolla (SPI\_SCK) ja datalinjojen avulla (SPI\_MOSI ja SPI\_MISO).

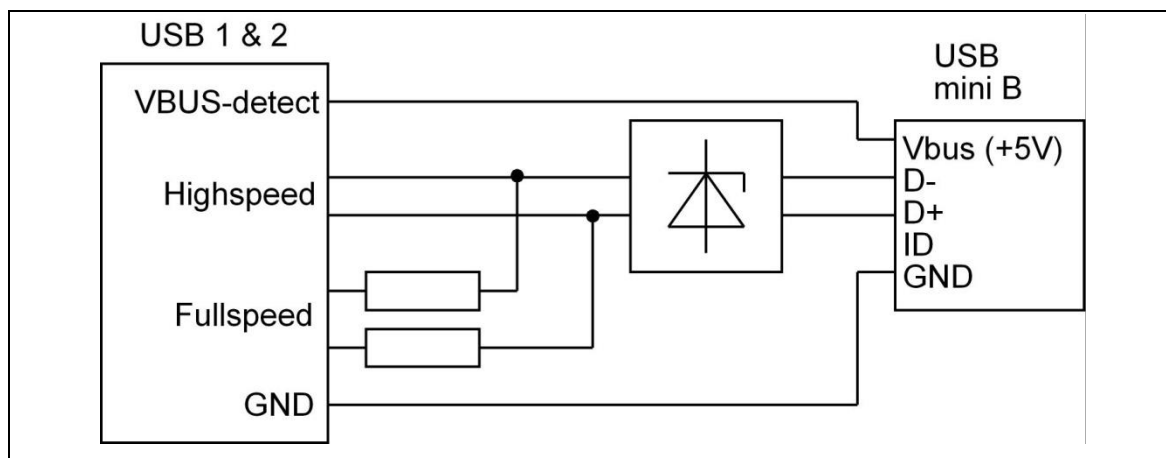
USB-väylää varten liittimestä löytyy väylän jänniteliitin (VBUS), jonka avulla ha-  
vaitaan tietokoneelta kytketty kaapeli tai syötetään USB-laitteelle käyttöjännite  
(OTG-tilassa). Väylän tieto kulkee USB\_D- ja USB\_D+-linjojen kautta. OTG:tä  
varten liittimessä on tunnist- ja kättelysignaali (USB\_ID). OTG-laitteelle syötet-

tävä jännite kytketään päälle ja pois VBUS\_EN-linjalla. Mikäli kytketty laite ottaa liikaa virtaa USB-liittimeltä, saadaan siitä tieto VBUS\_OC-linjalla.

### 5.1.1 Integroitu USB

Valittu kontrolleri sisältää USB 1-, 2- ja OTG-rajapinnat. Sisäiseen USB-ohjaimeen liitetyn CH-kortin avulla EM-12 voi olla joko päätelaite tai ohjaaja ulkoiselle liikennöintiyksikölle. Peruslaitteessa CH-2 (toiminnallinen kaavio kuvassa 9) on kalustettu päätelaitteeksi ja ohjelmistopuolella USB käyttää Atmelin CDC-kirjastoa (Communications Device Class), joten laite näkyy tietokoneeseen kytkettäessä sarjaliitännäisenä laitteena. USB-kaapelin kytkeminen havaitaan tarkkailemalla VBUS-detect-linjaa, joka mittaa USB:n väyläjännitettä (VBUS).

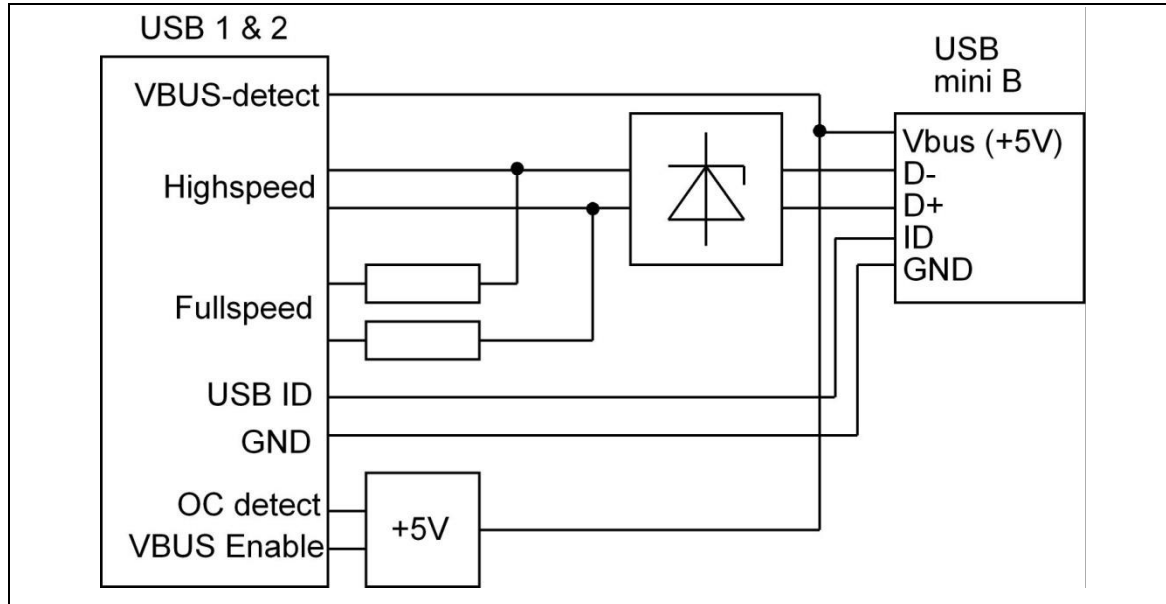
Kortin suunnittelussa otettiin huomioon myös staattiselta sähköltä suojautuminen. USB-liittimen runko on kytketty RC-piiriin kautta signaalimaahan (GND) ja datalinjat (D- ja D+) on suojattu diodisillalla (kuva 9).



KUVA 9. USB-device -kalustus

Jos laite toimii USB:n ohjaajana, täydennetään CH-2:n kalustus (kuva 10) ja ohjelmistoon lisätään OTG-kirjastot. Tässä kalustuksessa ja toimintamuodossa mittari voi toimia sen mukaan, onko USB-porttiin kytketty tietokone, massamuistilaite vai liikennöintirajapinnan sisältävä telepätelaite. Tietokoneelle mittari

näkyä sarjaliitännäisenä päätelaitteena. Massamuistilaitteelle mittari tallentaa kerääntyvää mittaushistoriaa. Telepäätelaitetta mittari komentaa liikennöinti-protokollapinon mukaisella komentokannalla.



KUVA 10. USB-OTG -kalustus

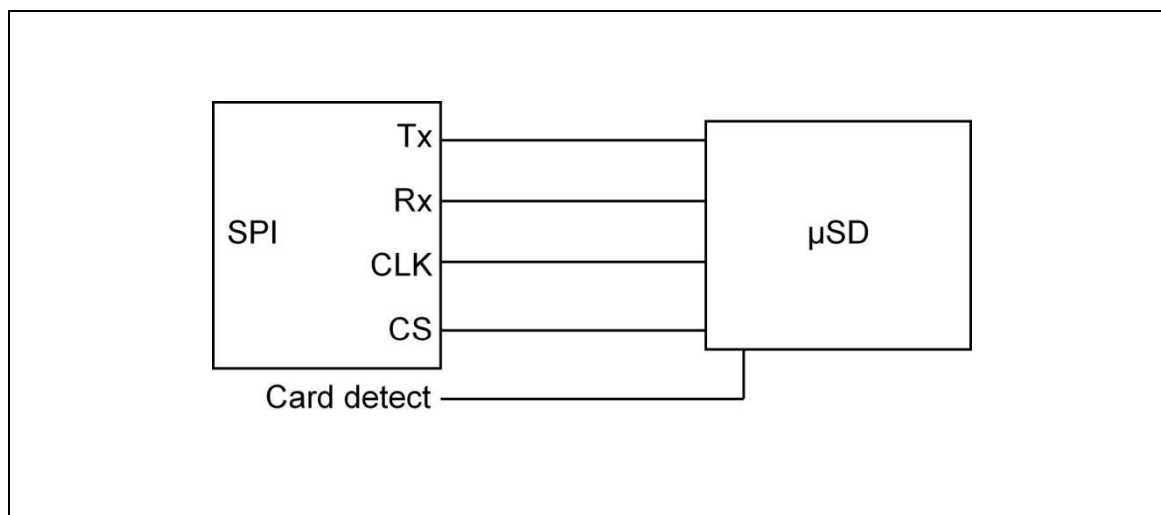
OTG:ssä ID-linjalla laitteet kättelevät ja tunnistavat toisensa. VBUS Enable -linja kytkee USB-väylään jännitteen ja OC detect -linjalla havaitaan, jos väylään kytketty laite ottaa liikaa virtaa.

### 5.1.2 µSD-korttipaikka

Kontrolleri liikennöi µSD-kortille SPI-väylän kautta. Tätä korttipaikkaa voidaan käyttää laitteen asetusten ja mittaushistorian tallentamiseen. Kontrollerin sisäinen SPI huolehtii tiedonsiirron ajoituksesta ja signaloinneista.

Kortin SPI-rajapinta (kuva 11) on yksinkertainen synkronoitu sarjaportti, johon kuuluu lähtevän (*Tx*) ja saapuvan (*Rx*) datan lisäksi liikennöinnin tahdistava kello (*CLK*) ja muistikortin valintasignaali (*CS*).

Card detect -linjalla tiedetään, milloin kortti on paikalla, jotta järjestelmä ei turhaan yritä liikennöintiä ja siten viivästyä muuta järjestelmän toimintaa.

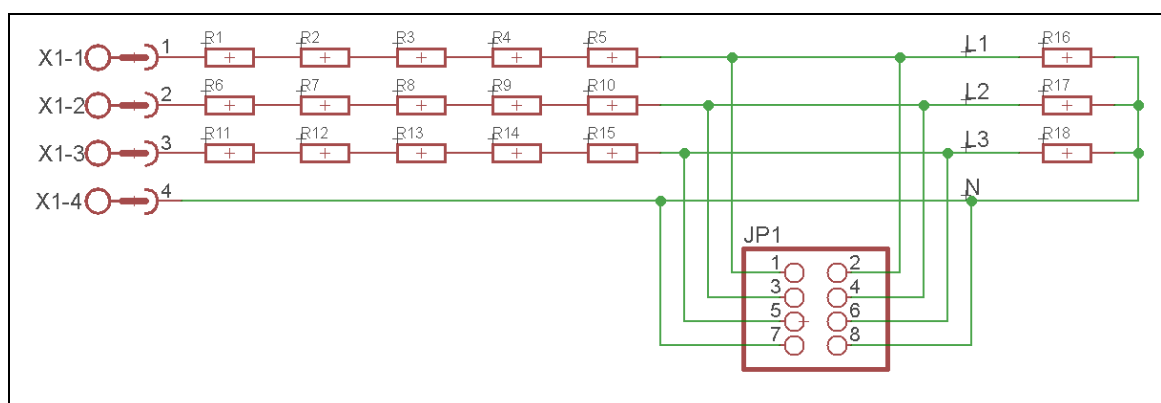


KUVA 11.  $\mu$ SD-kortin liityntä

## 5.2 Mittauskortti MC-6

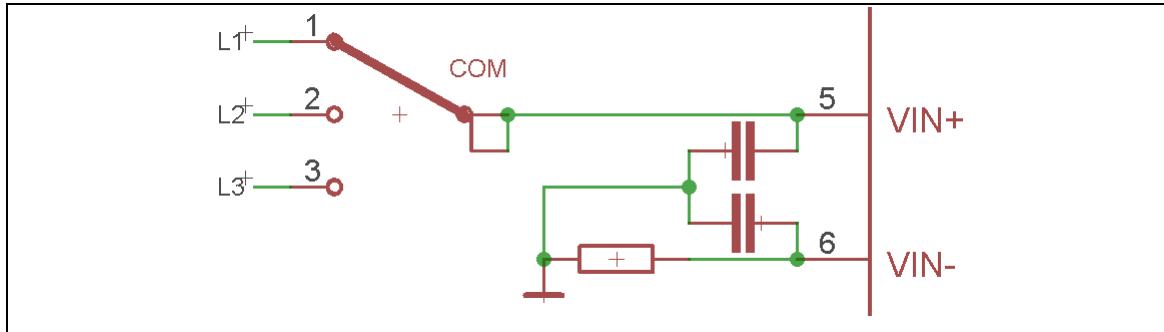
Mittauskortti sovitaa pohjakortilla alennetun jännitteen ja virta-antureilta tulevat jännitteet mittaussiireille. Kortin kytkentäkaavio on liitteessä 4. Varsinainen mitaus tapahtuu MC-kortilla olevilla kuudella Cirrus Logicin CS5480-piirillä (4). Jokainen piiri kykenee mittaamaan yhtä jännitettä ja kahta virtaa, joten virtamittaukset on aina suoritettava pareittain samaan vaihesyöttöön liitettyistä laitteista.

Kuvassa 12 nähdään jännitejakoketjut, joilla mitattava verkkojännite sovitetaan mittaussiireille sopivaksi. Käytettyjen vastusten tarkkuus vaikuttaa ensisijaisesti mittarin tarkkuuteen, kuten liitteestä 8 ilmenee.



KUVA 12. Sähköverkon jännitemittauksen sovitus

Kortissa on kuusi 3-asentoista kiertokytkintä, joilla valitaan piirin mittaama jännitelinja. Kytkimet näkyvät kuvassa 14 kortin alareunassa ja kuvassa 13 on niiden sähköinen kytkentä mittauspiirin suhteen.

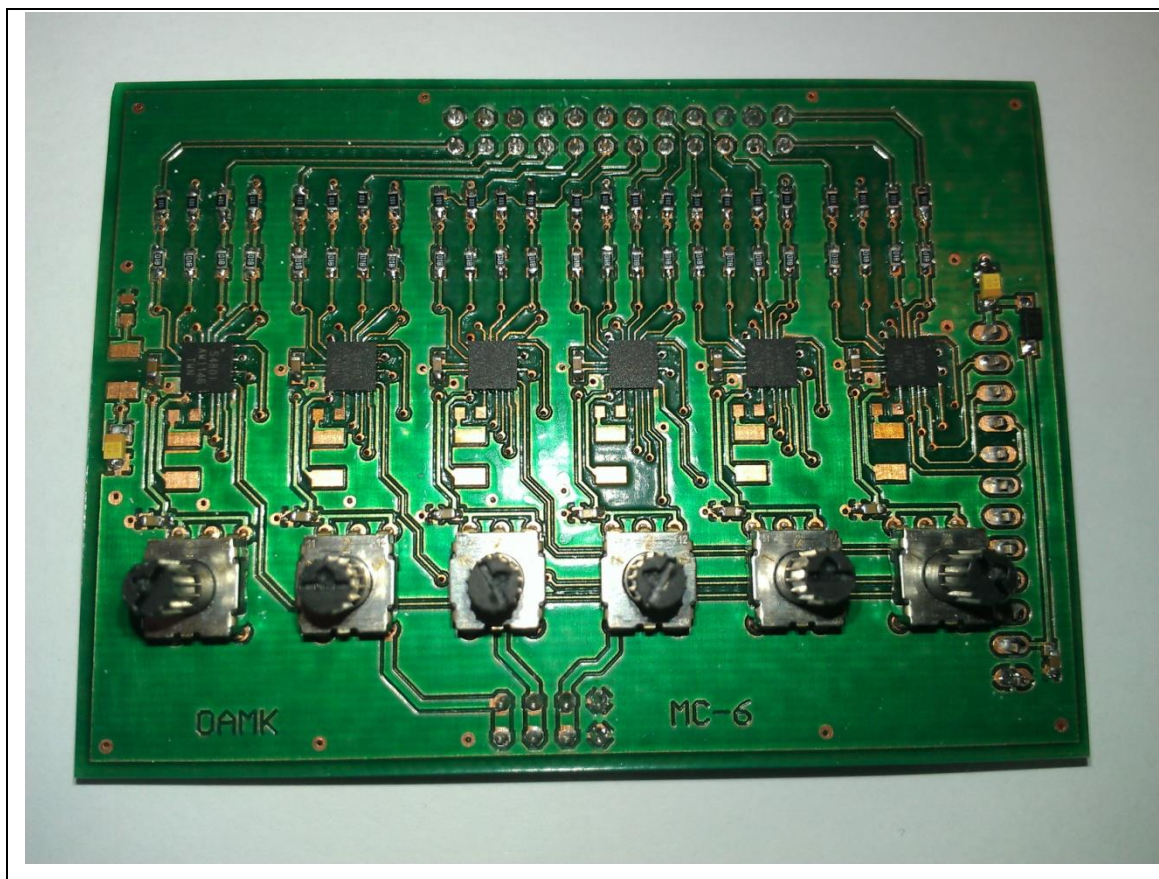


*KUVA 13. Jännitteen valinta mittauspiirille*

Valinta on tärkeää mittausten kannalta, koska 3-vaihekytkennässä syötöt ovat  $120^\circ$ :n vaihesiirrosta toisiinsa nähden ja täten vaikuttavat tehon laskentaan. Kolmivaihevirrassa vaiheet ovat  $120^\circ$  ( $360^\circ / 3 = 120^\circ$ ), jotta vaiheista yhteensä käytettävissä oleva teho on koko ajan yhtä suuri.

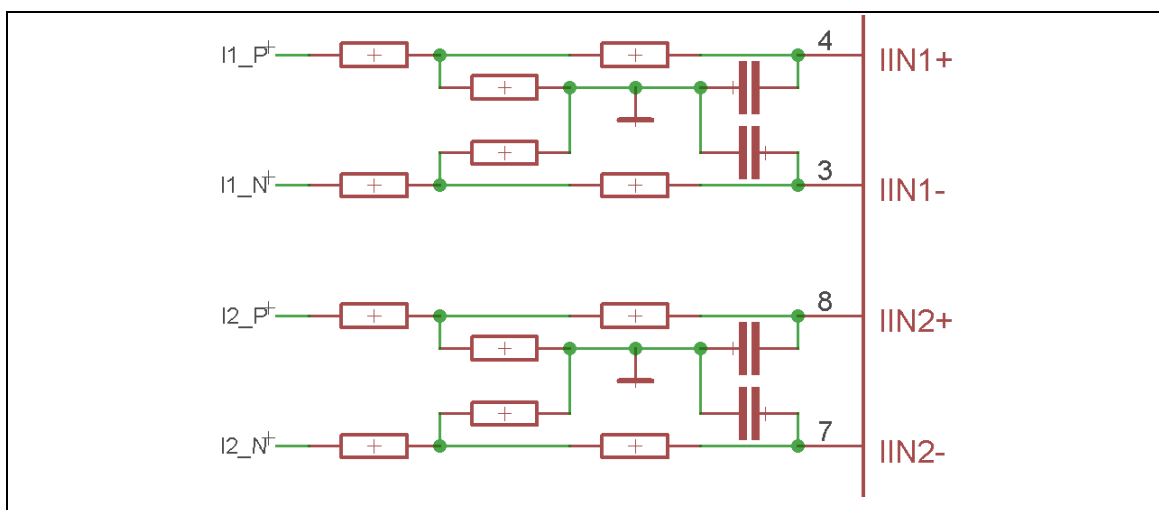
Virta-anturit (LEM TT 50-SD current transformer) kytketään ruuviliittimiin, jotka on helppo irrottaa ja uudelleen johdottaa tarvittaessa.





KUVA 14. MC-6-piirilevy

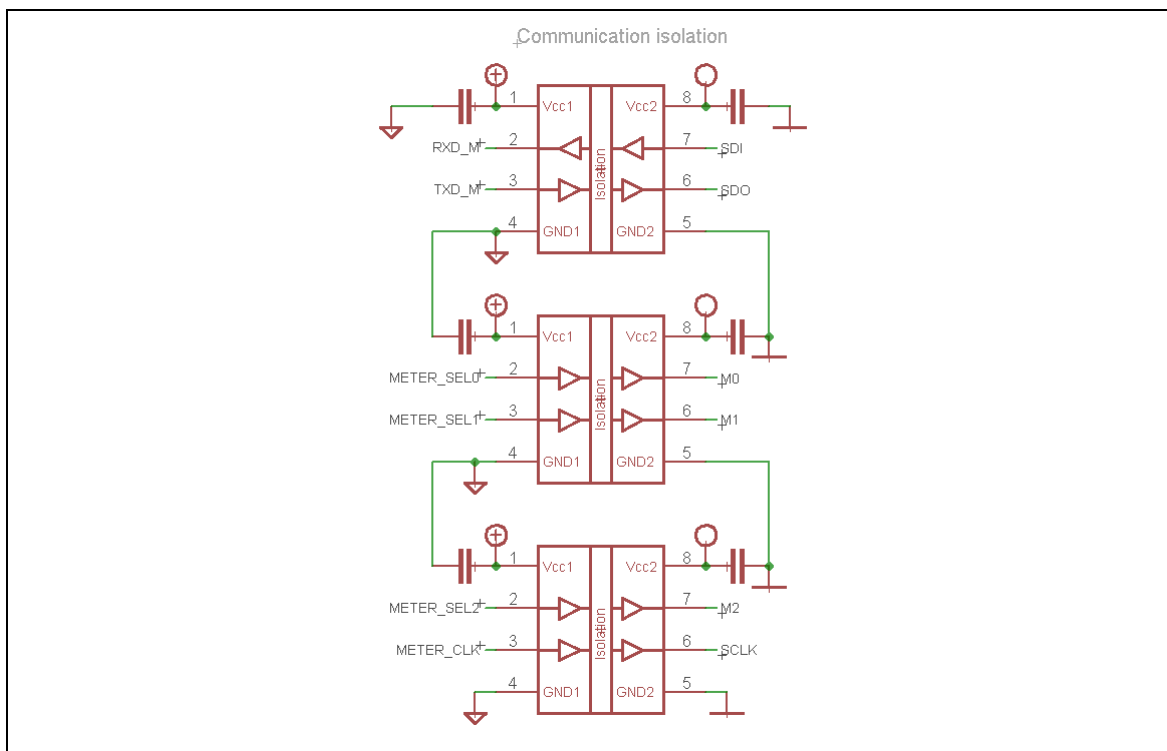
Koska käytettävä virranmittauksen anturi on virtakela, on siltä tuleva vaihtojännite vaimennettava ja sovitettava mittauspiirin referenssitason (GND) suhteen. Tämä tapahtuu kuvan 15 mukaisilla vastusketjuilla.



KUVA 15. Balansoidut virtamittaukset

Mikrokontrolleri keskustelee mittauspiirien kanssa isoloidun SPI-väylän kautta (kuva 16). Mittauspiirien valinta tapahtuu saman isoloidun väylän kautta tulevilla signaaleilla METER\_SEL0, METER\_SEL1 ja METER\_SEL2.

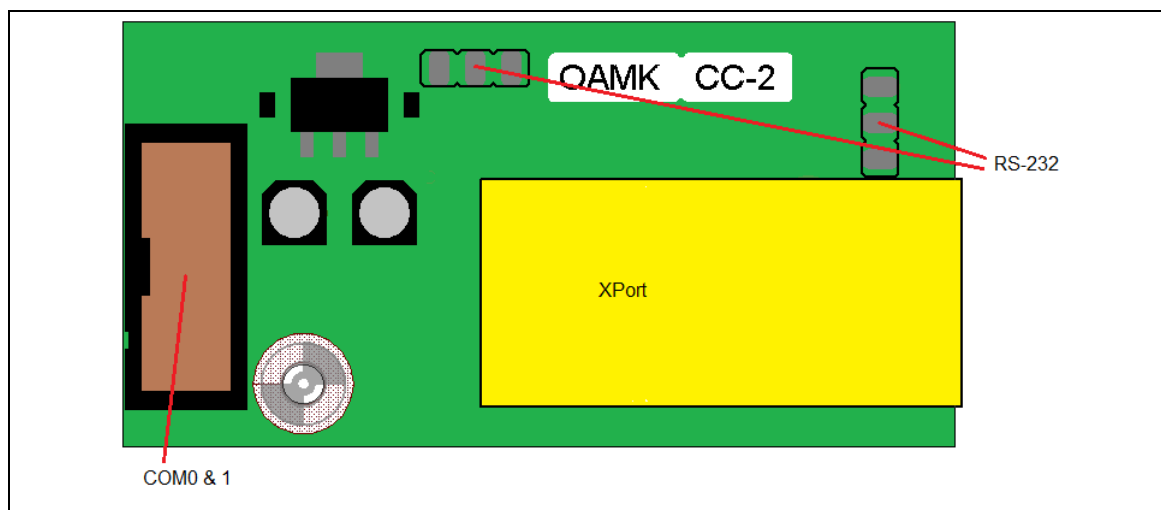
Tiedon siirto tapahtuu synkronisesti kellon (METER\_CLK) tahdissa TXD\_M- ja RXD\_M-linjojen kautta.



KUVA 16. Isoloitu liikennöintiväylä

### 5.3 Liikennöintikortti CC-2

Liikennöintikortti sovittaa kontrollerin sarjaliittynät (2 kappaletta). Kortissa on Lantronixin XPort, jonka kautta laite lähettää 6 sekunnin välein XML-muotoisen tietopaketin. CC-2:ssa (kuva 17) toisena porttina on RS-232-puskuripiiri. Liikennöintikortti CC-2:n kytkentäkaavio on liitteessä 6.



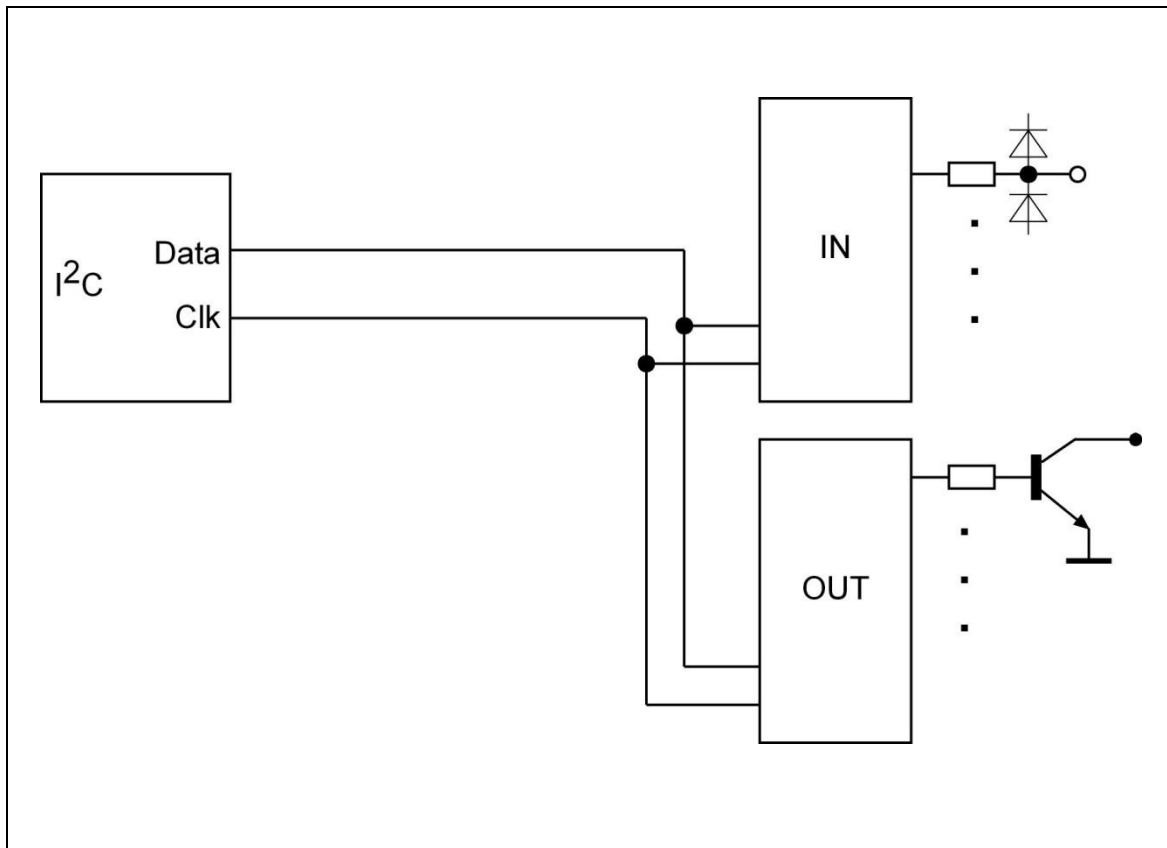
KUVA 17. CC-2 kortti

XPort on kompakti sarjaportin ja IP-verkon yhdyskäytävä, joka sisältää verkkosivupalvelimen sekä sähköposti-, TCP/IP- ja UDP-protokollat. XPortissa on integroitu RJ45-liitin ja täten se on suoraan liitettävissä paikalliseen IP-verkkoon ethernetkaapelilla.

#### 5.4 I<sup>2</sup>C-laajennusväylä

I<sup>2</sup>C-laajennus on lisätty, koska aiemman version kapasiteetti ei riittänyt mittauksen ja liikennöinnin lisäksi kovin paljon suurempaan suorituskyykyyn. 32-bittisen kontrollerin nopeus ja suorituskyyky riittävät esimerkiksi tätä väylää käyttäen lukemaan kytkimiä ja suorittamaan ohjauksia, jolloin energiamittari voisi olla kaksisuuntainen päätelaite kiinteistön valvonnassa.

Kuvassa 18 on yleinen kuva mahdollisen kortin lohkokaaviosta. Korttia ei ole suunniteltu ja se on mahdollinen jatkokehityksen kohde.



KUVA 18. I²C-väylän I/O-laajennus

## 5.5 Merkkivalot ja painikkeet

MC-kortin (kuva 14) vasemmassa reunassa on kortin jännitteeseen kytketty merkkivalo, joka pala jatkuvasti. Pohjakortissa (kuva 19) on molemmille jännitesyötoille omat merkkivalonsa (LEDit 1 ja 2), jotka palavat koko ajan. Statusmerkkivaloista toinen (LED 3) vilkahtaa aina, kun mittaukset suoritetaan ja sanoma lähetetään palvelimelle. Toinen statusvalo (LED 4) ilmaisee USB-liittynnän ja liikennöinnin tilaa.

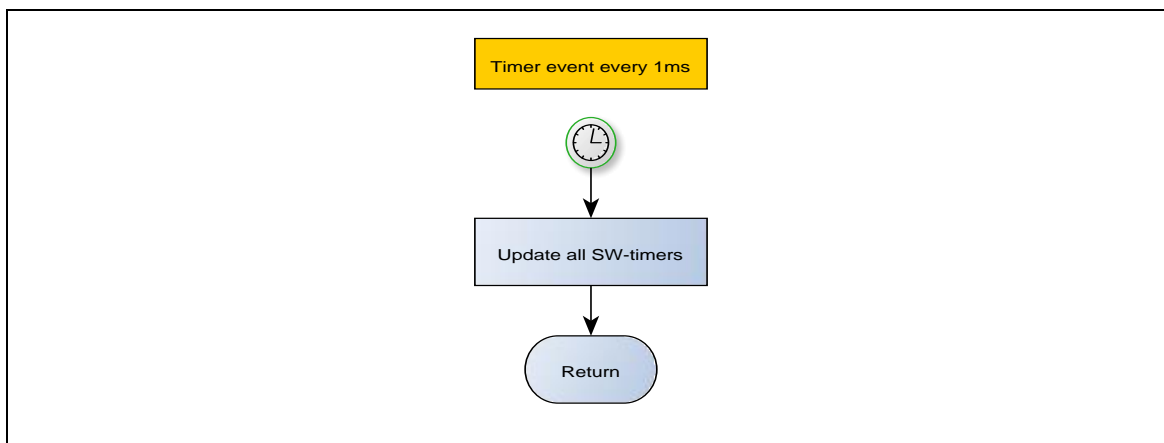
Laitteessa on painike, jota painamalla laite suorittaa uudelleenkäynnistyksen. Painiketta ei ole kytketty reset-linjaan, vaan se vaatii toimiakseen käynnissä olevan ohjelmiston.



KUVA 19. Pohjakortin merkkivalot

## 5.6 Ohjelmisto

Ohjelmiston toimintaa tahdistaa millisekunnin välein päivittyvä ajastinkeskeytys (kuva 20). Päätasolla ohjelmisto tarkkailee, onko liittynöiltä tullut sanomia tai jokin sekutilaskureista täyttynyt.



KUVA 20. Ajastinpalvelu

Ajastinpalvelu on yksinkertainen palvelurutiini, joka suoritetaan 1000 kertaa sekunnissa. Tämä rutiini päivittää kaikkien aktiivisten ohjelmallisten ajastimien statussia:

- pienentää laskuria, jos ajastin käytössä
- asettaa statuslipun ja pysäyttää ajastimen, jos aika umpeutunut.

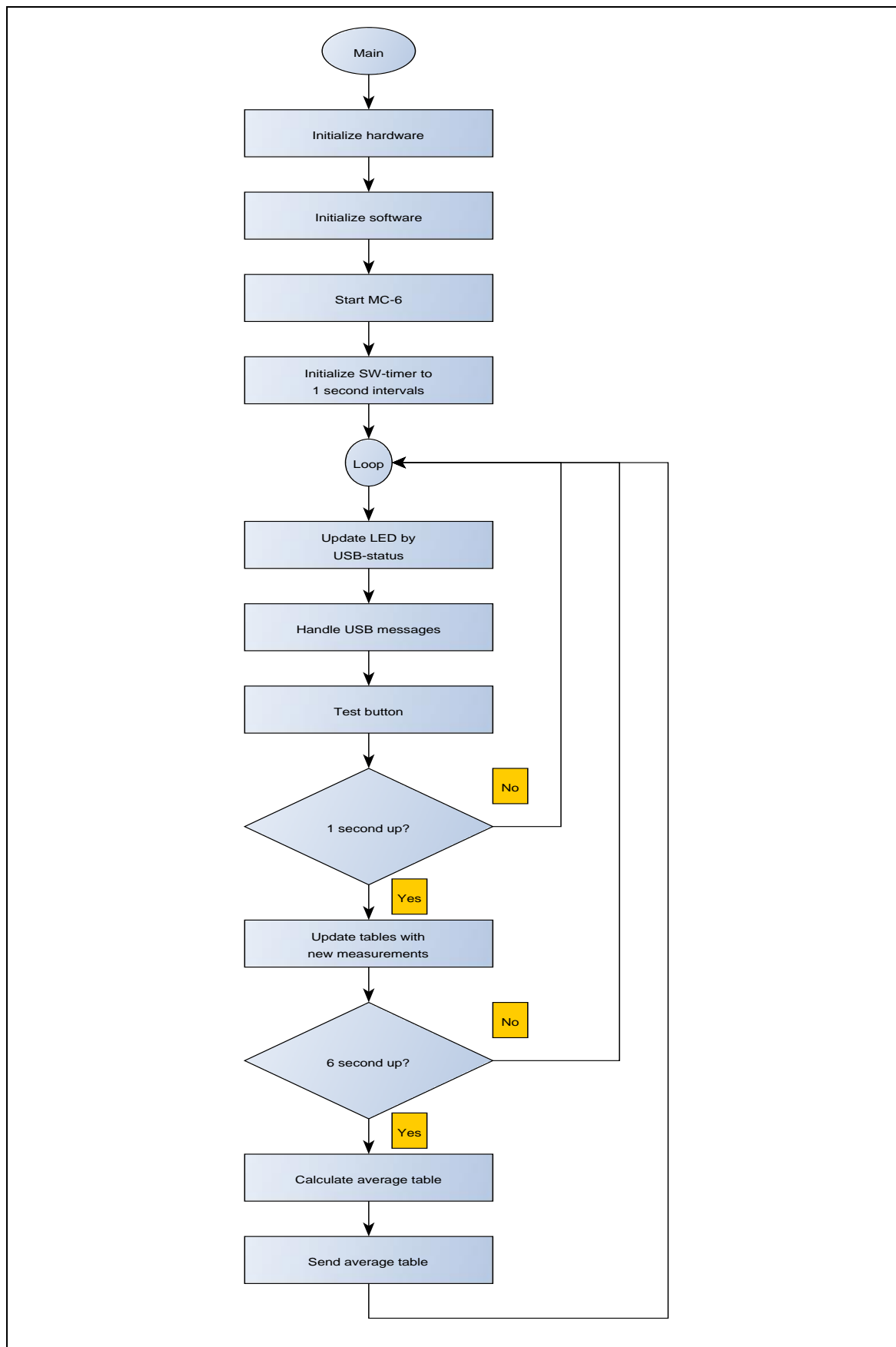
Sekunnin tullessa täyteen suoritetaan kaikilla MC-kortin piireillä jännite-, virta- ja tehokerroinmittaus. Saadut arvot tallennetaan taulukkoon. Kun taulukossa on kaikista mittauksista kuusi arvoa, lasketaan niistä keskiarvot. Keskiarvojen taulukko pakataan XML-muotoon (malli kuvassa 21) ja lähetetään palvelimelle.

```
<msg>
<dvc>EM-12</dvc>
<ver>Ver 1.00</ver>
<update>000000000000</update>
<id>00-20-4A-E7-F8-69</id>
<nc>6</nc>
<ch1>0000/0000/0000/0000/0000</ch1>
<ch2>0000/0000/0000/0000/0000</ch2>
<ch3>0000/0000/0000/0000/0000</ch3>
<ch4>0000/0000/0000/0000/0000</ch4>
<ch5>0000/0000/0000/0000/0000</ch5>
<ch6>0000/0000/0000/0000/0000</ch6>
</msg>
```

#### *KUVA 21. Tietopaketin rakenne*

Sarjaporttien (RS ja USB-CDC) liikennöinti tapahtuu sen mukaan, minkälaisia komentojonoja niistä saadaan. Pääohjelma kerää jatkuvasti taustalla sanomia liikennöintiporteilta ja käynnistää tulkin vastaa sitten, kun kokonainen sanoma alkumerkistä loppumerkkiin on saatu kasattua.

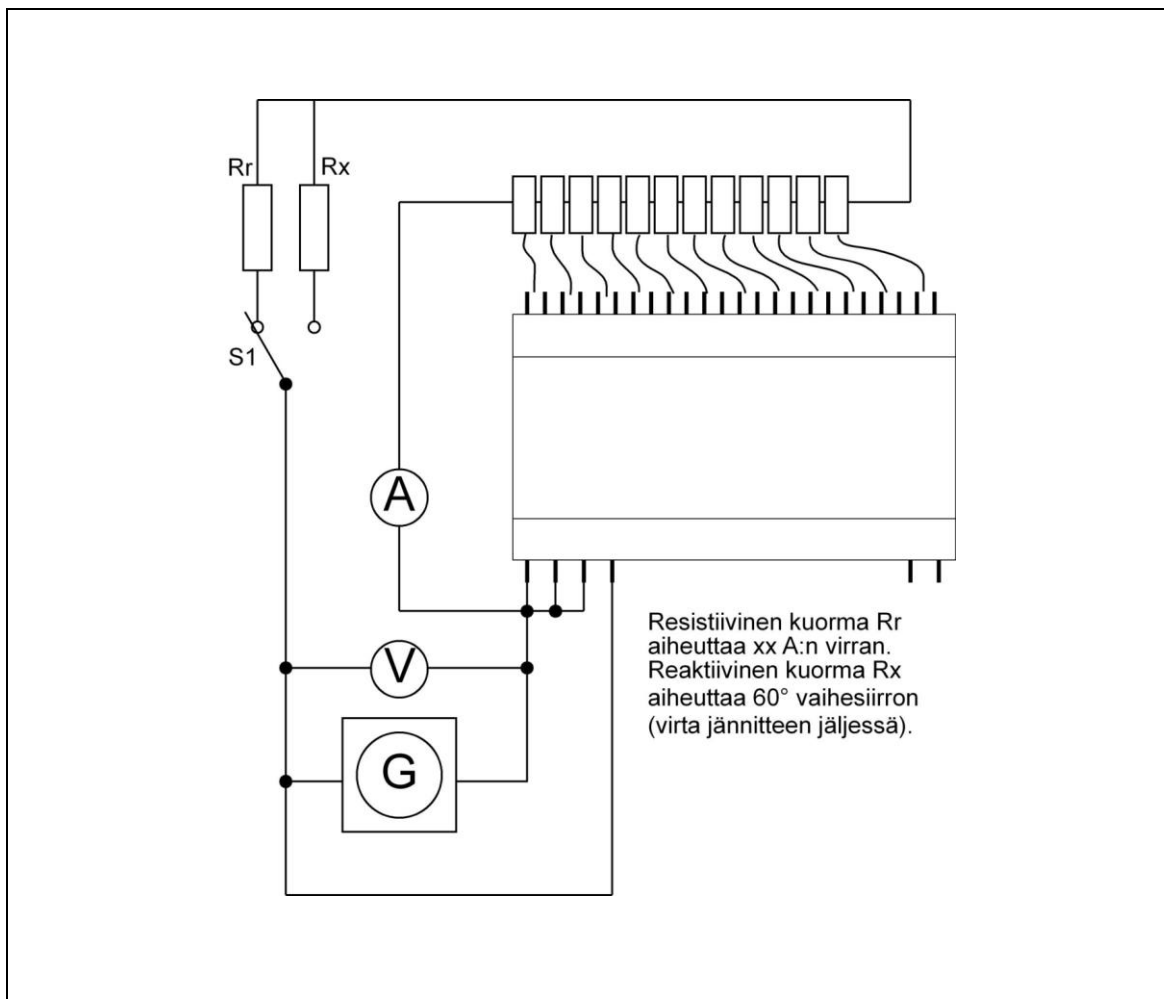
Pääohjelman vuokaavio on kuvassa 22. Ohjelmaa on kehitetty avoimen lähdekoodin periaatteella, joten lähdekoodeissa on pyritty käyttämään olemassa olevia avoimia kirjastoja. Atmelin ASF-kirjastot tulevat kehitysympäristön mukana lähdekoodeineen, joten kaikki sen ladanneet pääsevät käsiksi niihin. EM-12:n sovelluskoodi on Oulun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön, joka päättää sen jakelusta.



KUVA 22. Pääohjelman vuokaavio

## 6 MITTARIN KALIBROINTI

Laitteen kalibrointi tehdään kuvan 23 mukaisella kytkennällä ja käyttämällä tarkoitukseen suunniteltua ohjelmistoa. Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan mittarin nollapisteen (DC offset) kalibrointi ja tätä varten mittauskanavien on oltava jännitteettömät. Toisessa vaiheessa ohjelmoidaan jännite- ja virtakanavien mitaussuoran kulma säätämällä jännite- ja virta-arvot tarkkuusmittarin (opinnäytetyössä Fluke 435) avulla. Toisen vaiheen säädöissä keinokuorma on resistiivinen. Säädön tarkistusmittauksen väli pitäisi olla vähintään 2000 ms. Kolmannessa vaiheessa kuormaksi vaihdetaan reaktiivinen kytkentä ja säädetään mitauspiirien viiveet kanavakohtaisesti vastaamaan tarkkuusmittarin lukemaa. Piirin (Cirrus Logic) valmistaja suosittelee vaihesiirron kalibroinnissa käytettäväksi referenssijännitelähdettä, jonka virran pitäisi olla  $60^\circ$  jännitettä jäljessä.



KUVA 23. Kalibrointikytkennän rakenne



## 7 TESTAUS

### 7.1 Elektroniikan testaus

Koska laitteeseen valittiin uusi kontrolleri (liite 2), oli piirilevyn suunnittelussa otettava huomioon uusia asioita EMC:n suhteen, kuten suuremmista kellotaajuuksista aiheutuvat säteilevät ja johtuvat häiriöt. Valmistajalta löytyi suunnitteloille suunnattuja oppaita, joissa neuvottiin kiinnittämään huomiota jännitelinjoihin ja mahdollisiin häiriölähteisiin. Uusien integroitujen ominaisuuksien ansiosta suunnitteluihin tuli yksi uusi kortti (CH-kortti) ja aiemman liikennöintikortin muokkaus (CC-2). Protokortin kokoamisen jälkeen kortille suoritettiin käyttöjännitteen ja liikennöintilinjojen alustavat mittaukset. Kontrollerit toimitetaan esiohjelmoidulla bootloaderilla, joka mahdollistaa ohjelmiston syötön USB-liittynnän kautta ilman erillistä ohjelmointilaitetta.

Koska käyttöjännitteet olivat kunnossa ja kytkettäessä kortti tietokoneeseen Windows löysi bootloaderin rajapinnan, avautui nyt myös mahdollisuus ohjelmiston kehitykselle.

### 7.2 Ohjelmistojen testaus

Ohjelmiston kehityksessä ja testauksessa käytettiin Atmelin UC3-A3 Xplained -kokeilukorttia ja AVR Dragon -korttia. Dragonilla kohdekortti voidaan ohjelmoida ja ajaa ohjelma Studion debug-rajapinnan kautta. Dragon kytketään kohdekorttiin JTAG-liittimen avulla.

Ohjelmisto on tehty modulaariseksi, joten moduuleita voitiin testata erikseen kokeilukortissa ennen lopulliseen ohjelmaan siirtoa. Moduulien yhdistely kuitenkin tuotti ongelmia, kun osa kirjastoista käytti päällekkäisiä kirjastoja toisistaan poikkeavalla tavalla.

Ohjelma saatiin kerran ohjelmoitua korttiin ja sillä ajettiin kuormitustestiä soveluksen kaatumatta. Ohjelmiston päivityksen myötä USB-liityntä lakkasi toimi-

masta kortilta ja sitä ei saatu enää toimimaan edelliselläkään versiolla. Tässä vaiheessa syytä ruvettiin etsimään laitepuolelta.

Opinnäytetyössä päästiin tähän vaiheeseen. EM-12 on pohja, josta voi kehittää kaksisuuntaista etäpalvelupäätettä. Kaupalliseksi tuotteeksi saattaminen on jatkokehityksen paikka.

## 8 YHTEENVETO

Aihe opinnäytetyöhön tuli SuLA-hankkeessa tehdyn kevätprojektin loppuessa. Työssä jatkettiin energiamittarin kehittämistä tehokkaammaksi ja liitynnöiltään monipuolisemmaksi. Työ alkoi tutustumalla kesällä sähköturvallisuus- ja EMC-määräyksiin. Sähköturvallisuusmääräykset määrittivät riittävät eristysvälit eri lohkojen välille ja EMC-määräykset riittävät suodatukset jännitteeseen ja riittävät maadoitukset.

Uusi mikrokontrolleri toi mukana myös sekajännitekytkentöjen suunnittelun ongelmat, kun signaalien tasot piti sovittaa ja suojata 5 V:n ja 3,3 V:n järjestelmien välillä. USB-liitynnän integrointi toi häiriösuodatuksen (johtuvaa ja säteilevää) ja staattisen sähkönsuojaamisen osaksi kytkentäsuunnittelua.

Päätelaitteen on tarkoitus olla osa etäluenta ja -hallintajärjestelmää, jossa seurataan kiinteistöjen energian kulutusta ja sähkönsuodatusta. Riittävällä historiakerityksellä voidaan sopivalla tilastohallintasovelluksella havaita laitteistojen vaurioitumiset hetkellisarvojen poiketessa historiatiedon keskihajonnasta.

Päätelaitteen jatkokehityksenä voisi olla myös mahdollisten kompensointielementtien (kelat ja kondensaattorit) kytkeminen etäohjauksena tai paikallisälynä, jos vaihesiirrossa havaitaan riittävän suuria poikkeamia. Kuten kuvassa 3 nähtiin, kondensaattorit muuttavat vaihekulmaa negatiiviseen ja kelat positiiviseen suuntaan.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin protolaitte, jossa on kehittämismahdollisuuksia sekä paikallis- että etäkäyttöön.

## LÄHTEET

1. SuLA – Sustainable Living Assistant. 2012. Oulu University of applied Sciences. Saatavissa: <http://www.oamk.fi/hankkeet/sula/>. Hakupäivä 26.5.2014
2. Tekniikan kaavasto. 8. painos, maaliskuu 2010. Tampere: Tammertekniikka Oy.
3. AT32UC3A3/A4 Series Complete. 2014. Atmel. Saatavissa: <http://www.atmel.com/Images/doc32072.pdf>. Hakupäivä 4.5.2014.
4. CS5480 Three Channel Energy Measurement IC. 2013. Cirrus Logic. Saatavissa: [http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS5480\\_F3.pdf](http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatasheet/CS5480_F3.pdf). Hakupäivä 4.5.2014.

## **LIITTEET**

Liite 1 Lähtötietomuistio (Saatavissa tilaajalta)

Liite 2 Mikrokontrollerin valinta (Saatavissa tilaajalta)

Liite 3 EM-12 kytkentäkaavio (Saatavissa tilaajalta)

Liite 4 MC-6 kytkentäkaavio (Saatavissa tilaajalta)

Liite 5 CH-2 kytkentäkaavio (Saatavissa tilaajalta)

Liite 6 CC-2 kytkentäkaavio (Saatavissa tilaajalta)

Liite 7 Kalibrointiohje (Saatavissa tilaajalta)

Liite 8 Mittaustarkkuus (Saatavissa tilaajalta)